



# Influence de la loi de comportement sur la prévision de l'éclatement d'un disque de turbomachine

Matthieu Mazière, Jacques Besson, Samuel Forest, Benoit Tanguy, François Vogel, Hervé Chalons

## ► To cite this version:

Matthieu Mazière, Jacques Besson, Samuel Forest, Benoit Tanguy, François Vogel, et al.. Influence de la loi de comportement sur la prévision de l'éclatement d'un disque de turbomachine. 18ème congrès français de mécanique, Aug 2007, Grenoble, France. 6 p. hal-00192936

**HAL Id: hal-00192936**

**<https://hal.science/hal-00192936>**

Submitted on 14 Nov 2013

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Influence de la loi de comportement sur la prévision de l'éclatement d'un disque de turbomachine

M. Mazière, J. Besson, S. Forest, B. Tanguy, F. Vogel & H. Chalons

Centre des Matériaux, CNRS, Ecole des Mines de Paris  
UMR 7633, BP 87, 91003 Evry  
Téléphone : 33 1 60763045 / Télécopie : 33 1 60763150  
matthieu.maziere@mat.ensmp.fr

### Résumé :

*L'éclatement de disques de turbomachines est étudié dans cet article. Des outils de contrôle des calculs et de prévision de perte de stabilité sont d'abord mis en place pour réaliser des simulations numériques. Le modèle de comportement initial du matériau constituant les disques est ensuite reconsidéré en modifiant certains de ses paramètres tels que le critère de plasticité, la loi d'écrouissage, ou la loi d'écoulement. L'influence de ces modifications sur la vitesse limite des disques est enfin présentée.*

### Abstract :

*Burst of turbo-engine turbine discs is studied in this article. Some tools such as computation control algorithms and stability indicators are developed to perform numerical simulations. The initial behavior model of the constituent material of discs is then reconsidered changing some parameters such as the yield criterion, the hardening law, or the flow rule. The influence of those changes on the limit spin rate is finally presented.*

### Mots-clefs :

**Stabilité, Elastoviscoplasticité, Turbomachines**

## 1 Introduction

L'amélioration des turbomachines actuelles impose une prévision de plus en plus précise de la durée de vie des pièces les composant. La tenue en survitesse des pièces tournantes est également une vérification fondamentale à effectuer lors de la conception de nouveaux moteurs. La réglementation impose ainsi au motoriste de démontrer lors d'essais sur banc que les pièces en question n'éclatent pas sous l'effet du chargement centrifuge, cela pour des vitesses supérieures de 20% aux conditions normales de fonctionnement. Un des objectifs des recherches menées actuellement sur le sujet est d'arriver à évaluer une vitesse d'éclatement des disques en rotation, afin de compléter les essais expérimentaux réalisés jusqu'ici. La réalisation de cet objectif passe par le développement et l'utilisation d'outils performants pour évaluer les risques d'instabilités dans la structure, et par une connaissance précise du comportement du matériau utilisé.

Cette étude présente dans un premier temps certains outils disponibles dans la littérature ou développés par nos soins afin d'étudier les instabilités. Nous présenterons ainsi les algorithmes à longueur d'arc proposés notamment par Riks (1979), Crisfield et al. (1997) ; les critères de stabilité globaux comme ceux de Hill (1958), Hill (1959), Nguyen (2000), et locaux comme dans Drucker (1950), Estrin and Kubin (1988), Neilsen and Schreyer (1993). Ces outils permettent pour une loi de comportement donnée de dégager une vitesse maximale globale  $\omega_{Glo}$  correspondant à l'état de charge ultime admissible par la structure, ainsi qu'une vitesse d'apparition d'instabilités locales  $\omega_{Loc}$ .

Cependant la loi de comportement du matériau comporte de nombreux paramètres susceptibles d'influencer fortement la réponse de la structure. Les valeurs calculées des vitesses présentées ci-dessus sont tributaires de la précision prise lors de la description numérique du comportement. Il est donc indispensable d'évaluer la sensibilité des vitesses calculées envers ces différents paramètres, afin de nuancer les conclusions obtenues lors de la comparaison avec les résultats expérimentaux d'éclatement.

Après avoir présenté les outils utilisés, nous étudierons ici l'influence de trois paramètres à savoir, le critère de plasticité retenu, la dispersion des propriétés du matériau dans la pièce, et la viscosité. Ce dernier paramètre sera lui même étudié de deux manières, d'une part avec un modèle classique de type Norton, et d'autre part avec un modèle à sensibilité inverse en vitesse en tenant compte du vieillissement dynamique. Nous discuterons enfin de l'importance de tel ou tel paramètre sur les résultats obtenus.

## 2 Outils

### 2.1 Contrôle par longueur d'arc

Le problème mécanique d'un disque en rotation a été rapporté pour cette étude à un problème statique de chargement centrifuge. Le problème étant traité numériquement en grandes déformations, il existe un maximum en vitesse, même pour un comportement non adoucissant du matériau. Une méthode de pilotage du calcul uniquement en effort ne permet pas de dépasser ce point limite et entraîne une divergence du calcul lorsque l'on atteint cette valeur. Le contrôle par longueur d'arc permet lui de poursuivre la simulation et ainsi de déterminer une vitesse de rotation maximale théorique.

### 2.2 Critères de stabilité

La stabilité des disques en rotation a été étudiée ici à partir d'une formulation mécanique du problème en grandes déformations et en vitesse. Les critères obtenus et présentés dans (1) ont été définis dans Hill (1958); nous les avons étendus au cadre de chargements centrifuges. Ils sont basés sur une grandeur appelée travail du second ordre, équivalent au produit contracté du tenseur des taux de contrainte de Piola-Kirchoff 1  $\dot{\tilde{S}}$  par la dérivée temporelle du gradient de la déformation  $\dot{\tilde{F}}$ . Ce travail du second ordre se trouve corrigé dans le cas d'un disque en rotation en raison de l'augmentation de l'effort avec la déformation du disque et l'augmentation du rayon (effet spin-softening). On obtient la grandeur  $[SOW_C]$  donnée en (1) ainsi que les critères de stabilité locaux et globaux associés.

$$\left\{ \begin{array}{l} [SOW_C] = \dot{\tilde{S}} : \dot{\tilde{F}} - \rho_0 \|\underline{v} \times \underline{\omega}\|^2 \\ \text{Critère Global : } \omega_{Glo} \text{ tq } \int_{\Omega_0} [SOW_C] dv_0 < 0 \\ \text{Critère Local : } \omega_{Loc} \text{ tq } [SOW_C] < 0 \text{ en un point au moins} \end{array} \right. \quad (1)$$

### 2.3 Application

Une première série de modélisations a été effectuée sur des disques réels afin de comparer les valeurs de vitesse limite avec l'expérience. Dans un premier temps le modèle de matériau a été pris le plus classique possible et constituera la référence. La loi matériau elasto-viscoplastique a ainsi les attributs suivant : le critère de plasticité est ainsi celui de von Mises ; les

paramètres d'écrouissage, ceux de la peau du disque (cf section 3.2) ; et le modèle est pris sans viscosité. Les calculs sont effectués sur un disque de turbine haute pression (HP) de moteur d'hélicoptère pouvant être modélisé par un maillage en 2D axisymétrique. Les résultats obtenus sont présentés figure 1.

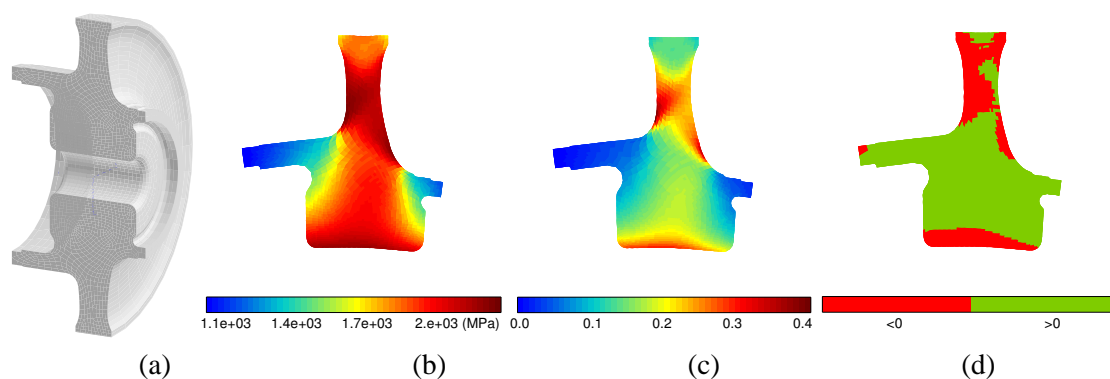


FIG. 1 – (a) Disque de turbine haute pression (b) Contrainte de von Mises (b) Déformation plastique cumulée (c) Signe du travail du second ordre  $[SOW_C]$

### 3 Influence des paramètres de la loi de comportement

#### 3.1 Influence du critère de plasticité

Le premier paramètre pris en compte dans cet étude est le type de critère de plasticité retenu. Parmi les critères isotropes on peut comparer les résultats obtenus avec le critère de Tresca à ceux de référence (obtenus avec le critère de von Mises). L'écart entre les deux critères est maximal pour une sollicitation de cisaillement ou de déformations planes et vaut alors  $\sqrt{3}/2$  soit une différence de 14% en contraintes. La différence en terme de vitesses de rotation peut alors atteindre jusqu'à 7%. Or, comme l'ont montré Timoshenko and Goodier (1934) et Roark and Young (1982), le chargement auquel est soumis un disque en rotation est essentiellement biaxial avec une prépondérance pour la contrainte tangentielle. On peut donc s'attendre à trouver une différence entre les modélisations effectuées avec les deux critères. Les deux calculs ont été effectués sur le disque HP et les résultats sont donnés figure 2.

#### 3.2 Influence du gradient des propriétés de matériau

Le deuxième paramètre étudié concerne le gradient des propriétés du matériau au sein d'un disque de turbine. Devy et al. (1990) ont montré que la vitesse de trempe entre la peau et le coeur d'un disque lors des traitements thermiques pouvait varier aisément d'un rapport 10, ce qui peut entraîner une variation de 10% sur la courbe d'écrouissage dans son ensemble. Il est donc intéressant d'évaluer l'influence d'un décalage de la limite d'élasticité ou de la contrainte maximale sur la vitesse limite. Au premier ordre, une variation de 10% en contrainte entraîne une variation de 5% en vitesse de rotation. Le calcul a été effectué sur le disque HP pour quatre lois de comportement à savoir celle de référence et trois autres affaiblies de 10% au niveau du  $R_0$ , de 5% au niveau du  $R_m$ , ou des deux. Les résultats sont donnés figure 3.

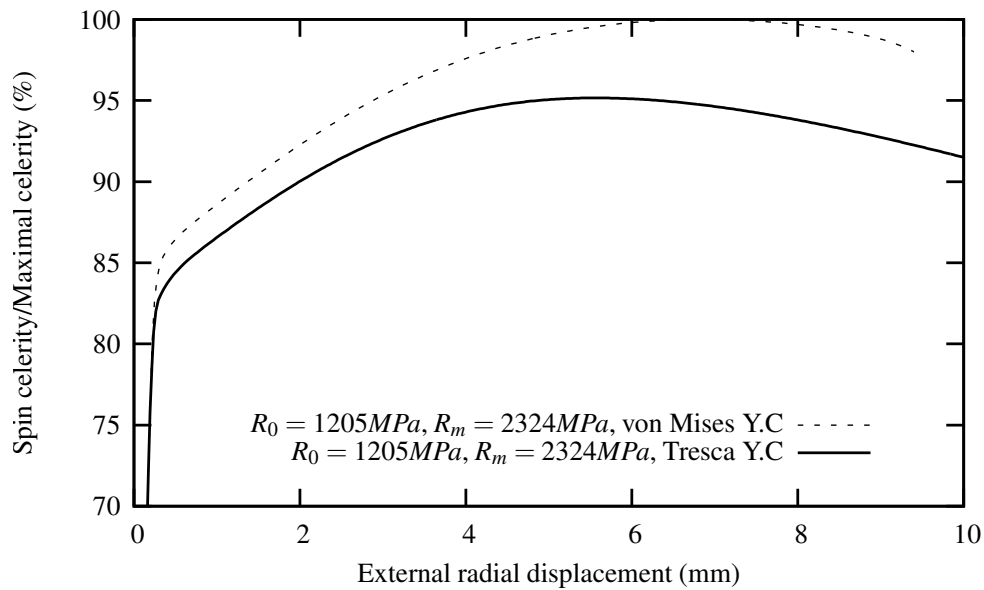


FIG. 2 – Influence du critère de plasticité

### 3.3 Influence de la viscosité

Le dernier paramètre étudié ici concerne la viscosité du matériau. Ce paramètre est introduit dans la loi de comportement à l'aide d'une relation d'écoulement entre le seuil de plasticité  $f$  et la vitesse de déformation plastique cumulée  $\dot{p}$ .

$$R(p, \dot{p}) = R(p) + f(\dot{p}) \text{ avec } f(\dot{p}) = \sigma_0 a \sinh\left(\frac{\dot{p}}{\dot{\epsilon}_0}\right) \quad (2)$$

Dans le cas plastique (pas de viscosité), la fonction  $f(\dot{p})$  est nulle. En viscosité classique cette fonction est croissante monotone. En comparaison avec le cas plastique, la stabilité de la structure se trouve alors augmentée en terme d'effort et diminuée en terme de déplacement. Comme pour le critère de plasticité et la limite élastique, la viscosité joue donc un rôle important dans l'évaluation des vitesses limites. Des calculs ont été effectués sur le disque HP pour différentes fonctions  $f(\dot{p})$  croissantes, et les résultats sont donnés figure 4.

Le dernier cas traité ici concerne un comportement du matériau présent dans certains alliages sensibles au vieillissement dynamique. Ce dernier présente alors une sensibilité inverse à la vitesse à savoir que la fonction  $f(\dot{p})$  est décroissante sur une plage de  $\dot{p}$ . Ce comportement se traduit par l'apparition de bandes de Luders ou par l'effet Portevin-Le Chatelier que nous avons simulé à l'aide d'un modèle proposé par McCormick (1989). La conséquence est une localisation de la vitesse de déformation dans une zone instable de la structure comme le montre l'exemple sur une plaque simple figure 5. Ce type de comportement sera testé ultérieurement sur des simulation de disques en rotation.

## 4 Conclusions

Le calcul de référence présenté dans la partie 2.3 a permis de dégager une vitesse de rotation limite d'un disque de turbomachine. Les résultats de ce calcul ont été ensuite nuancés en jouant sur trois paramètres principaux de la loi de comportement. Le changement de critère

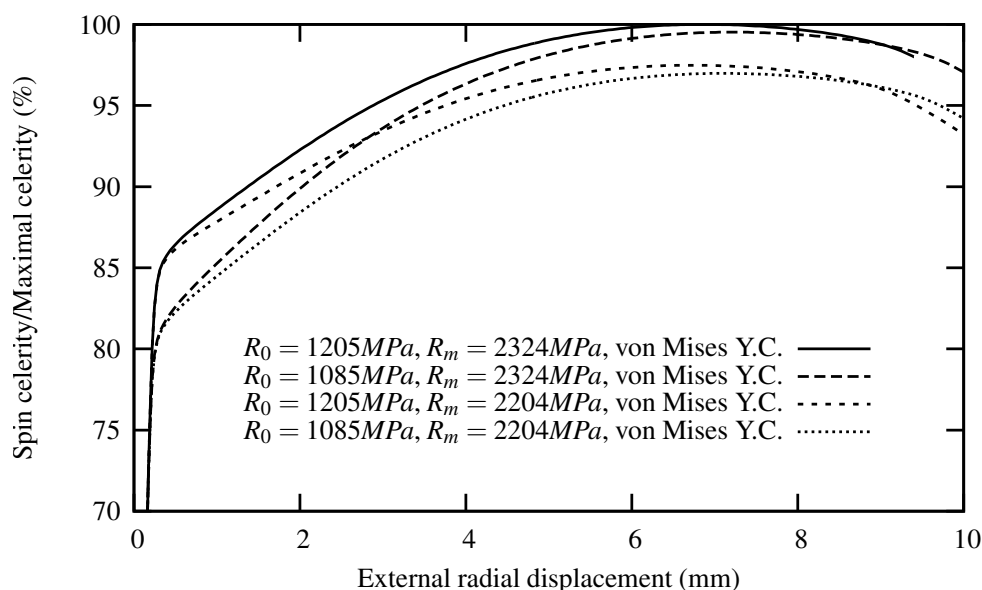


FIG. 3 – Influence de la loi d'écrouissage

de plasticité ou la diminution de la loi d'écrouissage ont affaibli le disque, la prise en compte d'une viscosité classique l'a renforcé. La prise en compte d'une viscosité à sensibilité inverse en vitesse accélère elle les instabilités locales dues aux phénomènes de localisation. Il nous reste à établir un modèle matériau complet et fidèle tenant compte de tous ces paramètres afin déterminer une vitesse d'éclatement des disques.

## Références

- Crisfield, M., Jelenic, G., Mi, Y., Zong, H., and Fan, Z. (1997). Some aspects of the non-linear finite element method. *Finite Element and Design*, 27 :19–40.
- Devy, F., Benallal, A., Boucherit, A., Marquis, D., and Mosser, P. (1990). Modélisation de la trempe à l'huile de disques de turboréacteurs en superalliage base nickel. *Revue Française de Mécanique*, 2 :143–157.
- Drucker, D. (1950). Some implications of work hardening and ideal plasticity. *Quarterly of Applied Mathematics*, 7 :411–418.
- Estrin, Y. and Kubin, L. (1988). Plastic instabilities : Classification and physical mechanisms. *Res Mechanica*, 23 :197–221.
- Hill, R. (1958). A general theory of uniqueness and stability in elastic-plastic solids. *J. Mech. Phys. Solids*, 6 :236–249.
- Hill, R. (1959). Some basic principles in the mechanics of solids without a natural time. *J. Mech. Phys. Solids*, 7 :209–225.
- MacCormick, P. (1989). Theory of flow localisation due to dynamic strain ageing. *Acta Metall.*, 36 :3061–3067.
- Neilsen, M. and Schreyer, H. (1993). Bifurcations in elastic-plastic materials. *Int. J. Solids Structures*, 30 :521–544.

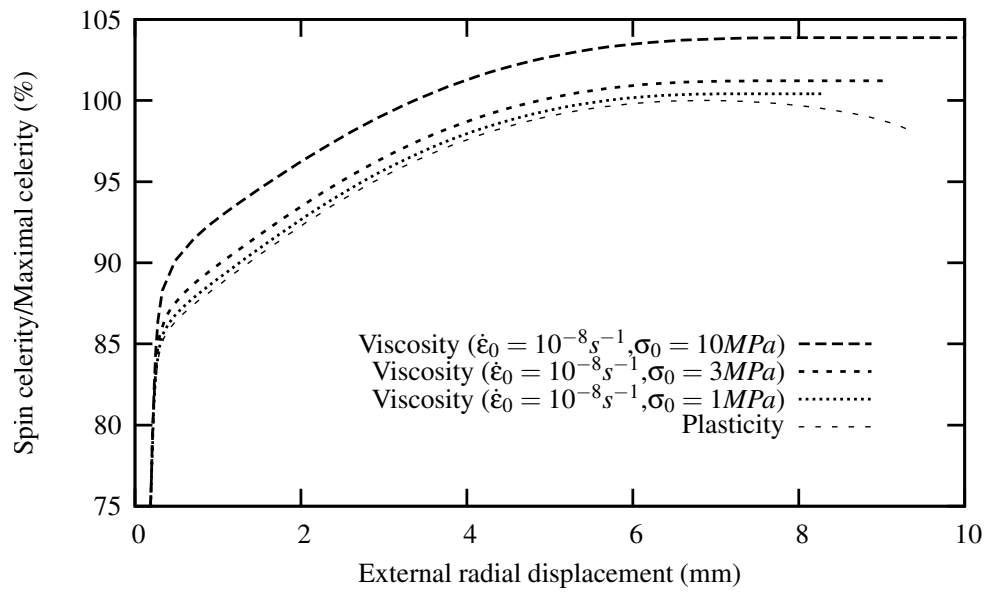


FIG. 4 – Influence de la viscosité

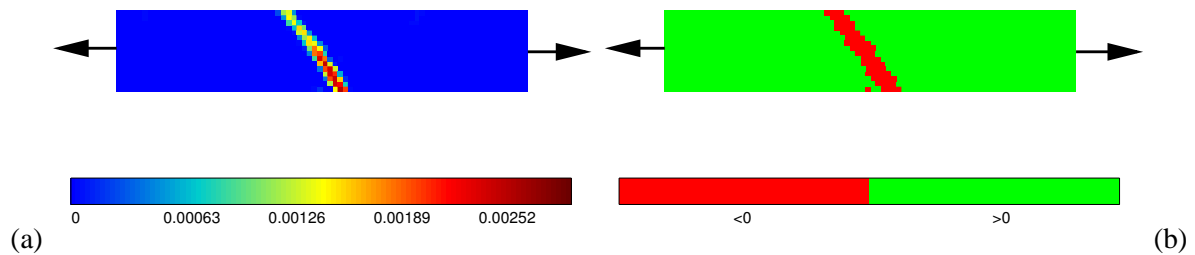


FIG. 5 – (a) Vitesse de déformation plastique cumulée (b) Travail du second ordre - Indicateur de stabilité

Nguyen, Q. (2000). *Stabilité et mécanique non linéaire*. Hermes.

Riks, E. (1979). An incremental approach to the solution of snapping and buckling problems. *Int. J. Solids Structures*, 15 :529–551.

Roark, J. and Young, W. (1982). *Formulas for stress and strain*. McGraw-Hill Edition.

Timoshenko, S. and Goodier, J. (1934). *Theory of elasticity*. McGraw-Hill Edition.